

УДК 621.371

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАКРОТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СЕТИ ПРИЕМНЫХ СТАНЦИЙ ГЛОНАСС И GPS

*Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова, А.А. Журавлев,
В.Е. Хуторов, А.А. Васильев*

Аннотация

По измерениям сети приемных станций сигналов ГЛОНАСС и GPS исследовано влияние макротурбулентности на распространение радиоволн. Исследован вклад ионосферы и тропосферы в общую величину структурной функции задержки радиоволн. Проведено сравнение с многолетними измерениями макротурбулентности в приземном слое.

Ключевые слова: распространение радиоволн, неоднородности ионосферы и тропосферы, макротурбулентность.

Введение

Несомненно влияние макротурбулентности на динамику и энергетику атмосферы и, соответственно, на радиоизмерения [1]. Однако макротурбулентные процессы в атмосфере пока слабо изучены, что связано с трудностями постановки эксперимента. В настоящей работе ставится задача экспериментального исследования макротурбулентных процессов по радиоизмерениям спутниковых навигационных систем (СНС).

С 2007 года по настоящее время на кафедре радиоастрономии Казанского государственного университета функционирует сеть приемных станций спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS, которая активно используется для исследований закономерностей и особенностей распространения радиоволн дециметрового диапазона и мониторинга атмосферы [2, 3] (см. рис. 1).

Как хорошо известно из космической радиофизики [1, 4], радиосигналы со спутников при распространении к поверхности Земли испытывают влияние неоднородностей ближнего космоса, ионосферы и тропосферы. Наиболее исследовано воздействие на радиоволны самых мелких неоднородностей – турбулентности [5, 6]. Однако практически не исследован вопрос о том, как влияют на характеристики радиоволн неоднородности более крупных размеров – макротурбулентности. Такая задача может быть решена только при измерениях на специализированной сети приемников, разнесенных на расстояния от нескольких сотен метров до нескольких километров.

1. Постановка задачи и метод исследования

Будем рассматривать влияние неоднородностей среды распространения только на радиотрассах «спутник – наземный приемник».

Определим минимальный масштаб макротурбулентности. Согласно классической теории случайных неоднородностей в атмосфере (см., например, [6, 7]) для

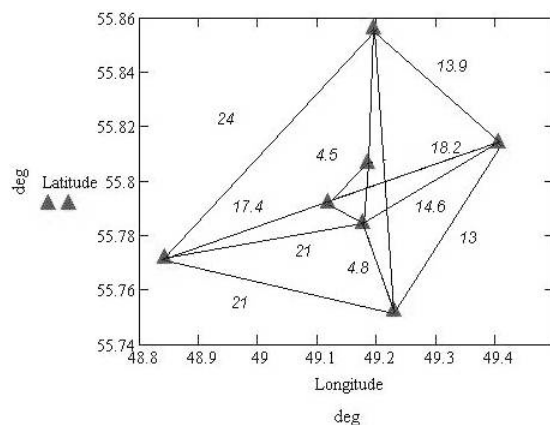


Рис. 1. Расположение сети приемных станций спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS в г. Казани, цифрами обозначены расстояния между станциями в километрах

самых малых размеров неоднородностей определяющим фактором являются диссипативные процессы (молекулярная вязкость и др.). Для более крупных неоднородностей справедливы законы изотропной турбулентности, для еще более крупных – квазидвумерная осесимметрическая турбулентность с постепенным переходом по мере увеличения размеров к макротурбулентности. Для приземного слоя атмосферы макротурбулентностью называют масштабы с размерами 600 м и более (см. [6, 8]).

Отметим, что вышеуказанные размеры макротурбулентности существенно меняются с высотой, так как значительно увеличиваются в размерах все неоднородности в атмосфере, ионосфере и ближнем космосе. Так, минимальный размер турбулентности, или внутренний масштаб, составляет в приземном слое 1–1.5 мм, а на высоте 90 км (нижняя ионосфера) по статистически надежным радиометеорным измерениям [8] он равен 25 м. Таким образом, вполне очевидно, что необходимо экспериментальное разделение вклада тропосферных и ионосферных неоднородностей в измерениях параметров радиоволн на трассах «спутник – антенна».

Опишем методику оценки влияния макротурбулентности при распространении радиоволн в атмосфере с использованием сети наземных пространственно-разнесенных высокоточных приемников систем ГЛОНАСС и GPS. Спутники систем позиционирования излучают радиосигналы в диапазонах длин волн 19 и 24 см. Наземные приемники измеряют параметры принятых радиосигналов (групповой и фазовый пути от спутника до антенны приемника, доплеровский сдвиг частоты несущей и др.), флуктуации которых связаны с различными атмосферными процессами, в том числе с вариациями параметров атмосферы [9].

Расстояние до спутника, измеренное приемником можно представить в виде:

$$L_j^i = \rho_j^i + I_j^i + \Delta L_j^i + \epsilon_j^i, \quad (1)$$

где нижний и верхний индексы – номера приемника и спутника соответственно, ρ – истинное расстояние между спутником и приемником (рассчитывается по известным координатам антенн и эфемеридам спутников [9]); I и ΔL – ионосферная и тропосферная задержки радиосигнала, измеряемые в единицах длины; ϵ – ошибки измерения, в том числе ошибки за счет ухода часов приемника и спутника.

Каждый приемник измеряет расстояние двумя способами: по времени распространения сигнала (кодовые измерения или псевдодалность, в этом случае ионосферные и тропосферные задержки зависят от групповой скорости распространения в среде) и по фазе принятого сигнала (в этом случае задержки определяются фазовой скоростью).

В (1) атмосферная поправка, характеризующая запаздывание радиоволн по сравнению с распространением в вакууме, определяется как интеграл от коэффициента преломления по пути, пройденной радиоволной в атмосфере:

$$I_j^i + \Delta L_j^i = 10^{-6} \int_s N(s) ds. \quad (2)$$

Интеграл взят по линии радиотрассы от спутника до антенны. Здесь N – индекс рефракции радиоволн. Это основная характеристика атмосферы как среды распространения радиоволн. Обычно используют следующее выражение, связывающее индекс рефракции N и коэффициент преломления n радиоволн с атмосферными параметрами [4, 9]:

$$N = (n - 1) \cdot 10^{-6} = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} + 4.03 \cdot 10^7 \frac{N_e}{f^2}, \quad (3)$$

где первое слагаемое определяется влиянием неполярных газов, а второе – водяным паром, p и T – давление и температура воздуха в миллибарах и Кельвинах соответственно, e – парциальное давление паров воды (мбар), третье слагаемое определяется ионосферой; N_e – электронная концентрация в ионосфере, f – частота радиоволн. Выражение (2) позволяет оценить зависимость коэффициента преломления от параметров атмосферы и определить степень их влияния на условия распространения радиоволн. Частотная зависимость ионосферного слагаемого позволяет разделить влияние тропосферы и ионосферы с помощью многочастотных измерений [9].

Как хорошо известно [1], на радиотрассе «спутник – наземный приемник» в каждой точке коэффициент преломления n можно разделить на две части: некоторую среднюю величину, плавно зависящую от времени и координат, и меняющуюся (сумму турбулентной и макротурбулентной). Соответственно, тропосферная и ионосферная задержки I и ΔL также обусловлены как систематическими, так и турбулентными атмосферными процессами. Характерное время жизни турбулентных процессов – несколько секунд, таким образом, усредняя измерения, мы исключаем быстрые процессы.

В практике исследований влияния неоднородностей на распространение радиоволн наиболее широко используются два метода: спектральный и метод структурных функций [6]. При измерении спектров надо учитывать, что в измеряемый сигнал входит суперпозиция неоднородностей абсолютно всех размеров, а при использовании структурных функций в измеряемый сигнал не входит влияние неоднородностей менее некоторого размера [6]. Для радиотрасс «спутник – наземный приемник» наиболее пригоден второй метод – структурные функции.

Мы строим структурную функцию атмосферных задержек в зависимости от горизонтального расстояния между приемными станциями сети ГЛОНАСС – GPS:

$$D_q(r) = \left\langle (q(0) - q(r))^2 \right\rangle. \quad (4)$$

Здесь q – соответствующий параметр (тропосферная или ионосферная задержка), первый член в скобках измеряется в опорном приемном пункте с условной

координатой (0), а второй – на расстоянии r от опорного пункта. Все измерения производятся для радиосигналов одного и того же спутника для каждой пары измерений в пространственно-разнесенных пунктах. Угловые скобки означают усреднение по времени. Структурная функция при наличии турбулентных процессов должна расти с увеличением r [4, 6].

Поскольку мы измеряем для определения характеристик макротурбулентности структурную функцию тропосферной задержки в двух приемных пунктах сети наземных пространственно-разнесенных высокоточных приемников систем ГЛО-НАСС – GPS для каждой синхронной по времени пары радиотрасс «спутник – наземный пункт», то вследствие одинакового влияния погрешностей, вносимых оборудованием навигационного спутника при синхронном приеме в двух наземных точках, мы имеем структурную функцию, обусловленную расстоянием между двумя приемниками (то есть макротурбулентностью) и погрешностями, вносимые двумя приемниками (полный аналог измерительных погрешностей любого измерения на поверхности Земли).

2. Структурные функции атмосферных задержек радиоволн на трассах спутник – наземный приемник

Для оценки влияния макротурбулентности и разделению этого влияния для тропосферной и ионосферной задержек был поставлен специальный эксперимент в августе 2009 г. (с 17 по 23 августа). Для проведения эксперимента были использованы двухчастотные приемники, расположенные практически на прямой линии. Характеристики приемников представлены в табл. 1.

Структурная функция оценивалась согласно (4) в интервале 0.85–5.2 км в течение всего эксперимента. Измерялись тропосферная задержка, ионосферная задержка и суммарная, или общая, атмосферная задержка спутниковых радиосигналов.

Вычислялась структурная функция – среднее значение по всем измерениям квадрата разности тропосферной задержки по формуле (4), при этом данные пар измерений для различных углов возвышения приводились к зенитному углу. Для исключения влияния турбулентности производилось осреднение по времени за час. Ранее получено, что параметры макротурбулентности изменяются для близких по времени часовых периодов измерений [10, 11]. Поэтому были проведены расчеты за весь период измерений.

На рис. 2–4 приведены примеры вычисления структурных функций атмосферных задержек радиосигналов СНС по измерениям 20 августа 2009 г. в г. Казани.

В табл. 2 приведен пример статистических оценок среднего значения структурных функций, ее дисперсии и число данных эксперимента, по которым можно оценить статистическую значимость полученных результатов.

Были проведены оценки значимости изменения структурных функций в зависимости от расстояния. С вероятностью не ниже 95% регистрируются изменения структурных функций тропосферной задержки в зависимости от горизонтального расстояния, что можно отнести к влиянию макротурбулентности. С помощью двухчастотных измерений было получено, что вклад ионосферы в атмосферные задержки, обусловленные макротурбулентностью с масштабами 0.85–5.224 км, существенно ниже тропосферных. Это вполне естественно, так как на ионосферных высотах средняя длина свободного пробега, внутренний масштаб турбулентности (а следовательно, и макротурбулентности) существенно больше, чем в тропосфере.

Эксперимент, проведенный по двухчастотным измерениям в августе 2009 г., позволяет заключить, что основной вклад в изменчивость структурных функций

Табл. 1

Технические характеристики приемников ГНСС

Антенна Novatel GPS-702 с платой приемника OEM-V3 (2 приемника)	Торсоп GB-1000 с антенной Торсоп CR-3
Двухсистемный	Двухсистемный
72 канала слежения	60 каналов слежения
Двухчастотный, рабочая частота 1575.42 и 1227.60 МГц	Двухчастотный, рабочая частота 1575.42 и 1227.60 МГц
Минимальная чувствительность -135 Дб	Минимальная чувствительность -165 Дб
Технология подавления многолучевости	Технология подавления многолучевости
Точность измерений фазы несущей -0.5 мм	Точность измерений фазы несущей -0.5 мм
Частота выдачи измерений 20 Гц	Частота выдачи измерений 20 Гц
Диапазон рабочих температур -400°C до $+750^{\circ}\text{C}$	Диапазон рабочих температур -400°C до $+750^{\circ}\text{C}$

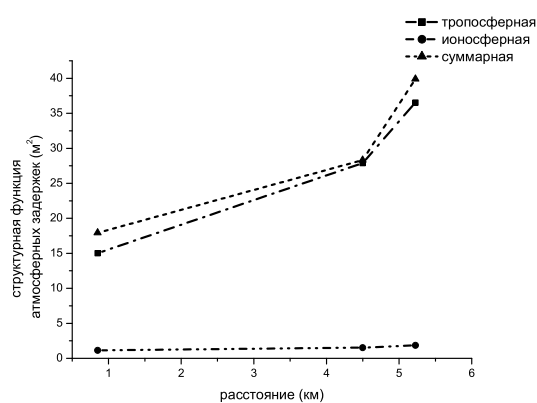


Рис. 2. Структурные функции атмосферных задержек радиосигналов СНС для 20.08.2009 8:00–9:00 UTC

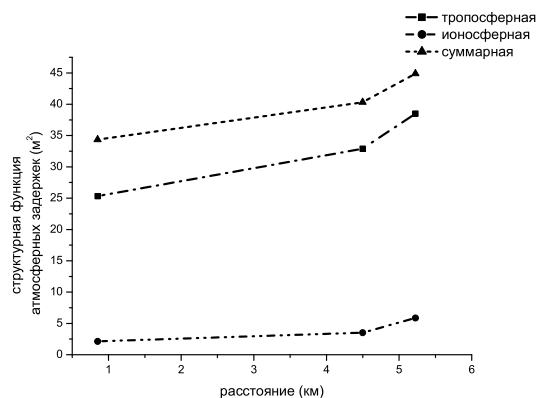


Рис. 3. Структурные функции атмосферных задержек радиосигналов СНС для 20.08.2009 15:00–16:00 UTC

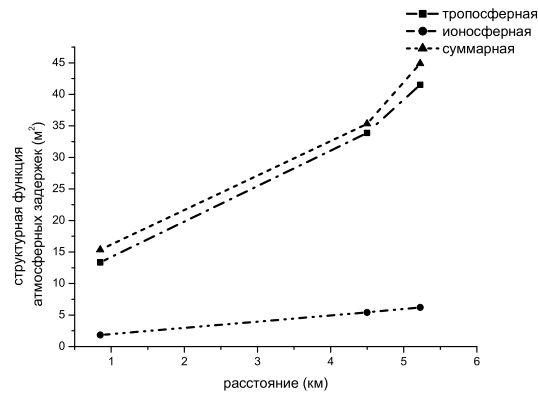


Рис. 4. Структурные функции атмосферных задержек радиосигналов СНС для 20.08.2009 19:00–20:00 UTC

Табл. 2

Среднее значение структурной функции атмосферных задержек и их дисперсий для 20.08.2009 19:00–20:00 UTC

r	trop	σ_{trop}	ion	σ_{ion}	sum	σ_{sum}	N
0.85	13.336	3.059	1.83	2.032	15.351	14.146	5342
4.497	33.897	5.514	5.427	0.957	35.32	15.269	4587
5.224	41.52	5.424	6.224	1.341	44.889	15.761	6548

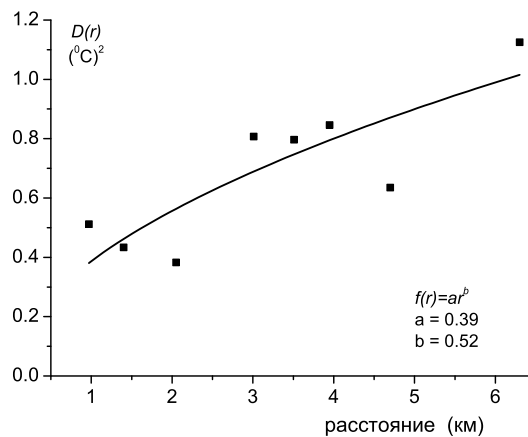


Рис. 5. Структурные функции атмосферной задержки радиосигналов СНС и ее степенная аппроксимация для 19.08.2009 16:00–17:00 UTC

дают тропосферные неоднородности. Поэтому далее для того же периода измерений строили структурные функции атмосферных задержек радиосигналов спутниковых навигационных систем с использованием измерений как двухчастотных, так и одночастотных приемников. Пример такой функции приведен на рис. 5.

Структурные функции были аппроксимированы степенными зависимостями. Исходя из представлений о виде структурной функции в исследуемом диапазоне масштабов [4, 6], аппроксимирующей функцией была выбрана степенная зависи-

мость вида $f(r) = ar^b$, где a – числовой коэффициент. С вероятностью не хуже 95% найдены показатели степени b . Они изменяются во времени за исследуемый период в пределах 0.6–0.8. Для сравнения полученных результатов с независимыми данными построили структурные функции метеопараметров в приземном слое атмосферы

3. Структурные функции метеопараметров в приземном слое

У нас есть опыт многолетних (более 10 лет) наблюдений макротурбулентных характеристик метеопараметров и примесей по ежеминутным измерениям в приземном слое атмосферы [10, 11]. Исследование базируется на данных длительного непрерывного мониторинга состояния приземного слоя атмосферы. Станции пространственно разнесены на расстояния от 0.9 до 6.3 км друг относительно друга. Измерения сети станций, расположенных в городской черте, охватывают широкий спектр атмосферных параметров, в том числе и основные метеорологические параметры. Аппаратура, методика и результаты измерений опубликованы в [10, 12, 13].

Взаимное расположение станций позволяет построить пространственные структурные функции измеряемых параметров согласно выражению (4). С помощью этих функций можно делать выводы о структуре макротурбулентных неоднородностей в приземном слое атмосферы. Оценка достоверности расчетов производилась путем построения доверительных интервалов, рассчитанных по критерию Стьюдента с вероятностью 95%. Исходя из представлений о виде структурной функции в исследуемом диапазоне масштабов аппроксимирующей функцией была также выбрана степенная зависимость.

Структурные функции температуры и концентрации водяного пара показали высокую степень независимости от преимущественного направления ветра. В пределах доверительных интервалов структурные функции совпадают как для взаимно противоположных, так и для взаимно ортогональных направлений ветра. Усредненные по взаимно встречным направлениям структурные функции и их аналитические аппроксимации для температуры и водяного пара представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Показатель степени для температуры и концентрации водяного пара имеет величину порядка 0.5 и с учетом погрешности (± 0.14) соответствует диапазону масштабов неоднородностей, где существенно действие архимедовых сил, что указывает на макротурбулентную природу неоднородностей с пространственными масштабами 1–6 км [4, 6, 7].

Выявлены общие закономерности поведения структурных функций метеопараметров (температуры, давления, влажности, скорости ветра) и концентрации примесей (аэрозоля, малых газовых примесей – CO, NO_x, SO₂ и др.), полученные по измерениям в тех же пространственно-разнесенных пунктах (1–6 км).

Сравнение структурных функций атмосферных задержек радиосигналов спутниковых навигационных систем со структурными функциями метеопараметров в приземном слое указывает на сходство закономерностей их пространственной изменчивости. Полученные аппроксимации структурных функций, высокая значимость показателей их роста позволяют сделать заключение о влиянии макротурбулентности на пространственную изменчивость радиоизмерений сигналов ГЛОНАСС и GPS. В свою очередь, структурные функции атмосферных задержек радиосигналов спутниковых навигационных систем могут служить численными характеристиками для оценки состояния атмосферы

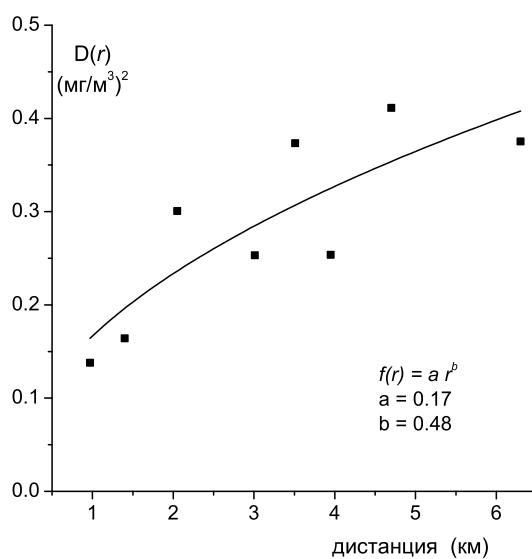


Рис. 6. Структурная функция температуры и ее степенная аппроксимация

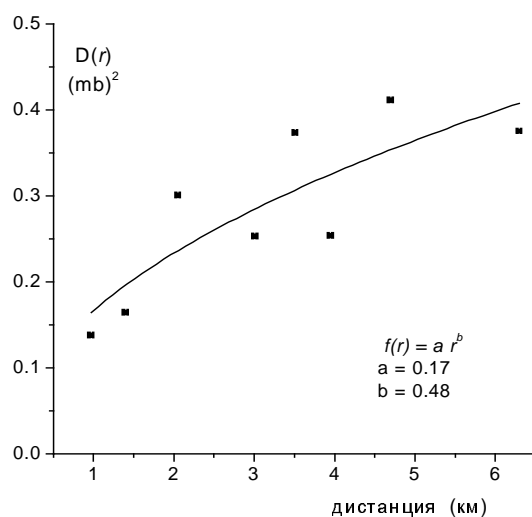


Рис. 7. Структурная функция концентрации водяного пара и ее степенная аппроксимация

Заключение

Проведен двухлетний цикл исследований влияния атмосферы и ионосферы на распространение радиоволн дециметрового диапазона с помощью сети приемников сигналов ГЛОНАСС и GPS.

Статистически надежно установлено влияние макротурбулентности на характеристики принятых радиосигналов (структурные функции тропосферной задержки в интервале 0.85–8.2 км).

Показано, что вклад ионосферной задержки радиоволн в структурную функцию существенно меньше тропосферной.

Проведенное сравнение с результатами многолетних наземных измерений метеопараметров макротурбулентности в этом же интервале масштабов неоднород-

ностей показали большое сходство с характеристиками макротурбулентности, полученными по измерениям структурных функции приемников сигналов ГЛОНАСС и GPS.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Государственный контракт № П162).

Summary

G.M. Teptin, O.G. Khutorova, A.A. Zhuravlev, V.E. Khutorov, A.A. Vasiliyev. The Macroturbulent Influence on Radiowave Propagation Investigated by the Set of the GPS – GLONASS Receivers.

The macroturbulent influence on radiowave propagation is investigated by the set of the GPS – GLONASS receivers. The contributions of the ionosphere and the troposphere in the total structure function of the radio waves delay were obtained. The comparison with long period measurements of macroturbulent atmospheric parameters at the ground level is made.

Key words: radiowave propagation, ionospheric and tropospheric inhomogeneity, macroturbulence.

Литература

1. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. – М.: Науч. книга, 1998. – 432 с.
2. Khutorova O.G., Vasiliyev A.A., Maksimov A.M. Real-time lower-tropospheric data system based on global position system stations // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. – 2007. – V. 13, No 1. – P. 21–27.
3. Khutorova O.G., Teptin G.M., Maksimov A.M., Khutorov V.E., Vasiliyev A.A. Investigations of space temporal structure for atmospheric inhomogeneities over Tatarstan // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. – 2007. – V. 13, No 3. – P. 20–24.
4. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. – М.: Связь, 1969. – 155 с.
5. Гурвич А.С., Воробьев В.В., Маракасов Д.А., Федорова О.В. Спектры сильных мерцаний за фазовым экраном с крупномасштабными анизотропными неоднородностями // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 9. – С. 747–765.
6. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
7. Мочин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидродинамика. – М.: Наука, 1965. – 539 с.
8. Тептин Г.М., Стенин Ю.М. Неоднородная структура нижней ионосферы и распространение радиоволн. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1989. – 104 с.
9. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. – Wien; New York: Springer-Verlag, 1994. – 356 p.
10. Журавлев А.А., Хуторова О.Г. Рефракция электромагнитных волн в реальной турбулентной атмосфере с загрязнениями. // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14, № 2. – С. 137–141.
11. Журавлев А.А., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Пространственная структура мезомасштабных неоднородностей концентрации примеси в нижней тропосфере // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14, № 6–7. – С. 543–546.
12. Хуторова О.Г. Волновые процессы в приземной атмосфере по синхронным измерениям примесей и метеопараметров. – Казань: Инновац. технол., 2005. – 275 с.

13. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Исследование мезомасштабных вариаций в тропосфере по наблюдениям концентрации примесей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 6. – С. 853–856.

Поступила в редакцию
05.10.09

Тептин Герман Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.

Хуторова Ольга Германовна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.

E-mail: *olga.khutorova@ksu.ru*

Журавлев Андрей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.

Хуторов Владислав Евгеньевич – студент кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.

Васильев Алексей Анатольевич – аспирант кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.